

(12)特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局(43) 国際公開日  
2004 年 9 月 30 日 (30.09.2004)

PCT

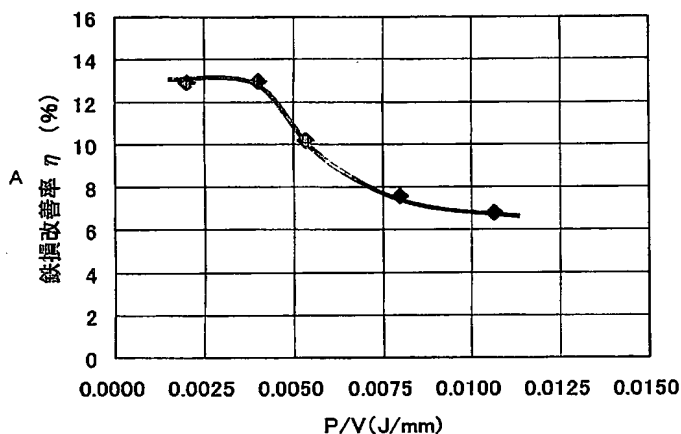
(10) 国際公開番号  
WO 2004/083465 A1

- (51) 国際特許分類<sup>7</sup>: C21D 8/12, C22C 38/00, B23K 26/00, H01F 27/24, 41/02, H01S 3/067
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2004/002866
- (22) 国際出願日: 2004 年 3 月 5 日 (05.03.2004)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願2003-075930 2003 年 3 月 19 日 (19.03.2003) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 新日本製鐵株式会社 (NIPPON STEEL CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008071 東京都千代田区大手町二丁目 6 番 3 号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および  
(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 坂井 辰彦 (SAKAI, Tatsuhiko) [JP/JP]; 〒2938511 千葉県富津市新富20-1 新日本製鐵株式会社 技術開発本部内 Chiba (JP). 濱村 秀行 (HAMAMURA, Hideyuki) [JP/JP]; 〒2938511 千葉県富津市新富20-1 新日本製鐵株式会社 技術開発本部内 Chiba (JP). 浜田 直也 (HAMADA, Naoya) [JP/JP]; 〒2938511 千葉県富津市新富20-1 新日本製鐵株式会社 技術開発本部内 Chiba (JP).
- (74) 代理人: 青木 篤, 外 (AOKI, Atsushi et al.); 〒1058423 東京都港区虎ノ門三丁目 5 番 1 号 虎ノ門 3 7 森ビル 青和特許法律事務所 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR,

[続葉有]

(54) Title: GRAIN-ORIENTED MAGNETIC STEEL SHEET EXCELLENT IN MAGNETIC CHARACTERISTIC AND ITS MANUFACTURING METHOD

(54) 発明の名称: 磁気特性の優れた方向性電磁鋼板とその製造方法

A...CORE LOSS IMPROVEMENT RATE  $\eta$  (%)

(57) Abstract: A grain-oriented electrical steel sheet having an irreducible minimum core loss thanks to scanning irradiation of a focused laser beam. The mode of the laser beam is the TEM<sub>00</sub> mode. The laser beam emitted from a continuous wave fiber laser of which the oscillation wavelength  $\lambda$  is in the range of  $1.07 \leq \lambda \leq 2.10 \mu\text{m}$  is scanned at generally regular intervals generally perpendicularly to the rolling direction of the steel sheet to improve the magnetic characteristic. A method for manufacturing such a grain-oriented magnetic steel sheet is also disclosed. The diameter  $d$  [mm] of the focused irradiation beam in the rolling direction, the linear velocity  $V$  [mm/s] of the scanning of the laser beam, the laser average output power  $P$  [W], the widths  $W1$  [mm] of the formed irradiation indentations or the closure domains, and the pitches  $P1$  [mm] between the irradiation indentations in the rolling direction are in the ranges below.  $0 < d \leq 0.20$   $0.001 \leq P/V \leq 0.012$   $0 < W1 \leq 0.20$   $1.5 \leq P1 \leq 11.0$

(57) 要約: 本発明は、極小集光されたレーザビームの走査照射により、極力鉄損の低い方向性電磁鋼板とその製造方法を提供するもので、TEM<sub>00</sub>モードであり、発振波長  $\lambda$  が  $1.07 \leq \lambda \leq 2.10 \mu\text{m}$  の連続発振ファイバーレーザを、鋼板の圧延方

[続葉有]



BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告書

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG,

2 文字コード及び他の略語については、定期発行される各 *PCT* ガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

向に対して概垂直で、且つ概一定間隔で走査照射して磁気特性を改善した方向性電磁鋼板とその製造方法であり、照射ビームの圧延方向集光径  $d$  [mm]、レーザビームの走査線速度  $V$  [mm/s]、レーザの平均出力  $P$  [W]、形成された照射痕幅または環流磁区幅  $Wl$  [mm]、照射痕の圧延方向ピッチ  $Pl$  [mm] が以下の範囲である。  $0 < d \leq 0.20$   
 $0.001 \leq P/V \leq 0.012$      $0 < Wl \leq 0.20$      $1.5 \leq Pl \leq 11.0$

## 明 細 書

## 磁気特性の優れた方向性電磁鋼板とその製造方法

## 技術分野

本発明は、磁気特性の優れた方向性電磁鋼板とその製造方法に関するものである。

## 背景技術

圧延方向に磁化容易軸がそろった方向性電磁鋼板がトランス鉄芯材料として用いられている。方向性電磁鋼板の製造方法として、特公平6-19112号公報にYAGレーザー照射により圧延方向にほぼ垂直に、且つ圧延方向に周期的な線状の歪みを導入し、鉄損を低減する方法が開示されている。この方法の原理は、レーザービームの走査照射による表面歪みを起因として形成される環流磁区により180°磁壁間隔が細分化され、特に異常渦電流損が低減されるというものであり、磁区制御と呼ばれる。

従来、この技術には様々な方法が開示されており、例えば、特開平6-57333号公報にはパルス発振CO<sub>2</sub>レーザーを用いる方法、また、上記特公平6-19112号公報には連続発振YAGレーザーを用いて、照射ビーム径、パワー、走査速度等を規定した方法で、しかも表面照射痕が発生しない方法も開示されている。いずれも方法も照射条件をある特定の範囲に限定することで鉄損改善効果が向上することが開示され、現在実用に供されている。しかし、トランス鉄芯の鉄損低減に対するニーズは依然として高く、更に鉄損の低い電磁鋼板を高効率で製造する方法が望まれていた。

鉄損は主に古典的渦電流損、異常渦電流損、およびヒステリシス

損の合計である。古典的渦電流損は板厚によってほぼ決まる損失であり、レーザ磁区制御によって変化する損失は異常渦電流損とヒステリシス損である。レーザ磁区制御により付与された還流磁区は180°磁壁間隔を細分化して異常渦電流損を低減させるが、一方でヒステリシス損を増加させる要因となる。よって圧延方向にはできるだけ狭い環流磁区を形成する方がヒステリシス損の増加が少なく、トータルの鉄損は低くなる。しかし、環流磁区が狭すぎると磁区細分化効果は小さくなり、その結果、特公平6-19112号公報に記述されるように、YAGレーザを用いた場合、照射ビーム径を極小化するとレーザビームの走査線速度あるいはレーザパワーを調整しても優れた鉄損改善効果が得られないという問題があった。

#### 発明の開示

本発明の課題は、極小集光されたレーザビームの走査照射により、極力鉄損の低減された方向性電磁鋼板とその製造方法を提供することにある、その要旨は以下の通りである。

(1) 連続発振レーザビームの走査照射により、鋼板の圧延方向に対して概垂直で、且つ概一定間隔で線状の環流磁区を形成して鉄損特性を改善した方向性電磁鋼板の製造方法において、レーザが、ビーム伝搬方向に垂直な断面内のレーザ光強度分布が光軸中心近傍に最大強度を持つTEM<sub>00</sub>モードであり、照射ビームの圧延方向集光径d [mm]、レーザビームの走査線速度V [mm/s]、レーザの平均出力P [W]が以下の範囲であることを特徴とする磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法。

$$0 < d \leq 0.2$$

$$0.001 \leq P/V \leq 0.012$$

(2) 前記d、V、Pが以下の範囲であることを特徴とする(1)記

載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法。

$$0.010 \leq d \leq 0.10$$

$$0.001 \leq P/V \leq 0.008$$

(3) 前記d、V、Pが以下の範囲であることを特徴とする(1)記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法。

$$0.010 < d \leq 0.060$$

$$0.002 \leq P/V \leq 0.006$$

(4) 前記d、V、Pが以下の範囲であることを特徴とする(1)記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法。

$$0.010 < d < 0.040$$

$$0.002 \leq P/V \leq 0.006$$

(5) 照射レーザービーム形状の圧延方向径をd、それと直交方向の径を $d_c$ 、レーザー平均出力をPとした時、瞬時パワー密度 $I_p$  [kW/mm<sup>2</sup>] を $I_p = P/(d \times d_c)$ で定義し、 $I_p$ の範囲が $0 < I_p \leq 100 \text{ kW/mm}^2$ であることを特徴とする(1)～(4)のいずれかの項に記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法。

(6) 前記レーザー装置が、発振波長 $\lambda$ が $1.07 \leq \lambda \leq 2.10 \mu\text{m}$ の連続発振ファイバーレーザー装置によるものであることを特徴とする(1)～(4)のいずれかの項に記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法。

(7) 前記レーザー装置が、平均出力10W以上の連続発振ファイバーレーザーであることを特徴とする(6)記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法。

(8) レーザービームの走査照射により、鋼板の圧延方向に対して概垂直で、且つ概一定間隔で線状の環流磁区を形成して鉄損特性を改善した方向性電磁鋼板において、レーザービーム照射痕およびまたは線状環流磁区の圧延方向幅 $W_1$ が、 $0 < W_1 \leq 0.2 \text{ mm}$ であることを特徴

とする磁気特性の優れた方向性電磁鋼板。

(9) レーザビーム照射痕およびまたは線状環流磁区の幅 $W1$ が $0.01 \leq W1 \leq 0.1\text{mm}$ であることを特徴とする(8)記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板。

(10) レーザビーム照射痕およびまたは線状環流磁区の幅 $W1$ が $0.01 \leq W1 \leq 0.04\text{mm}$ であることを特徴とする(8)記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板。

(11) レーザビーム線状照射痕およびまたは線状環流磁区の圧延方向間隔 $P1$ が、 $1.5 \leq P1 \leq 11.0\text{mm}$ であることを特徴とする(8)～(10)のいずれかの項に記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板。

(12) レーザビーム線状照射痕およびまたは線状環流磁区の圧延方向間隔 $P1$ が、 $3.0 \leq P1 \leq 7.0\text{mm}$ であることを特徴とする(8)～(10)のいずれかの項に記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板。

#### 図面の簡単な説明

図1は、鉄損改善率のパワーと走査速度との比率パラメータ依存性を示す図。

図2は、本発明にかかわるレーザ照射方法の説明図。

図3は、 $\text{TEM}_{00}$ モードの模式図。

図4は、マルチモードの模式図。

図5は、本発明の範囲内における $\text{TEM}_{00}$ モードのビーム集光照射による鋼板表面近傍の温度分布計算結果を示す図。

図6(a)は、本発明の範囲内において、比較的 $P/V$ が高い場合における $\text{TEM}_{00}$ モードのビーム集光照射による鋼板表面近傍の温度分布計算結果を示す図。

図6(b)は図6(a)のレーザ照射条件における鋼板の断面観察写真。

図 7 は、マルチモードのビーム集光照射による鋼板表面近傍の温度分布計算結果を示す図。

図 8 は、図 5 および図 7 の温度分布計算結果をビーム中心での深さ方向の温度変化を比較した結果を示す図。

図 9 (a) は、本発明の代表的なレーザ照射痕の表面光学顕微鏡写真で、図 9 (b) は磁区構造のSEM写真。

図 10 は、鉄損改善率とP/Vの関係を示す図。

図 11 は、照射痕幅で近似したW1と鉄損改善率の関係を示す図。

図 12 は、照射痕の圧延方向ピッチP1と鉄損改善率の関係を示す図。

図 13 は、 $I_p$ とコート後の層間電流の関係を示す図。

#### 発明を実施するための最良の形態

以下に実施例を用いて、本発明の効果とその効果発現の理由を説明する。

図 2 は本発明にかかわるレーザビームの照射方法の説明図である。レーザビーム 1 は図示されないファイバーレーザ装置から出力される。ファイバーレーザは半導体レーザを励起源としてファイバーコア自身が発光するレーザ装置であり、発振ビーム径はファイバーコア径により規制されている。

ところでレーザ共振器から出力されるレーザビームは波長、媒質の直径、共振器ミラーの曲率等で決定される種々の強度分布を持つビームモードの重ね合わせである。これらの各モードは次数の異なるガウスモードで表され、共振器内での発振可能なビーム断面が大きい程、高次のモードまで発振する。一般のYAGレーザ等はこれらの複数のモードが同時に発振し得るため、マルチモードビームと呼ばれる。図 4 に典型的なマルチモードビームの強度分布を示す。

一方、ファイバーレーザの場合、ファイバーコア直径が0.01mm程度のシングルモードファイバーを用いることで、発振可能なモードが規制され、容易に最低次数での単一モード発振が可能である。このモードはほぼ基本ガウス分布に相当し、一般に $TEM_{00}$ モードと呼ばれる。 $TEM_{00}$ モードは図3に示すように、光軸中心で最大強度を持つガウス分布であり、このビームを集光した場合、集光点でも同じ強度分布を持つ。

ビームのモードを示す指標としては、一般にビーム品質ファクター $M^2$ が用いられており、 $TEM_{00}$ モードの $M^2$ 理論計算値は1.0であり、高次モードになるに従い $M^2$ は増加する。上述のシングルモードファイバーレーザで得られるビームの $M^2$ は1.1以下であり、ほぼ理想的な $TEM_{00}$ モードである。一般のマルチモードYAGレーザ等の $M^2$ 値は20以上である。したがって、本発明に用いるレーザビームの $TEM_{00}$ モードとは強度分布が略ガウス分布であるものを含み、 $M^2$ 値としては2以下に相当する。

本発明の一実施例では、ファイバーレーザ装置から出力される $TEM_{00}$ モードのレーザビーム1を図2に示すように走査ミラー2とf $\theta$ レンズ3を使用し、方向性電磁鋼板4のX方向に走査照射した。なお、X方向は方向性電磁鋼板の圧延方向に概ね垂直方向である。集光点でのビーム直径dは約0.05mmである。ビーム直径はレーザパワーの86%が含まれるビーム直径で定義される。ビームの走査線速度Vは3000~16000mm/sである。レーザ平均出力は32Wで固定した。また圧延方向の照射ピッチP1は5mmである。

レーザ照射によって発生する歪みは鋼板表面への投入エネルギー密度に依存すると考えられることから、本発明者らは、ビームの走査照射法において投入エネルギー密度に比例するパラメータであるレーザ平均出力P (W=J/s) と走査速度V (mm/s) の比率P/V (J/mm



）に注目した。図 1 は本実施例における P/V と鉄損改善率との関係を調べた実験結果である。鉄損改善率  $\eta$  はレーザ照射前後の鉄損値  $W_{1.7/50}$  (W/kg) から次式によって定義される。

$$\eta = \{ (\text{レーザ照射前の } W_{1.7/50} - \text{レーザ照射後の } W_{1.7/50}) / \text{レーザ照射前の } W_{1.7/50} \} \times 100 \quad (\%)$$

ここで  $W_{1.7/50}$  は、磁界強度 1.7T、周波数 50Hz での鉄損値である。本実施例で用いた方向性電磁鋼板サンプルの板厚は 0.23mm であり、レーザ照射前の  $W_{1.7/50}$  の範囲は 0.85～0.90W/kg である。

図 1 より TEM<sub>00</sub> モード、集光直径  $d$  が 0.05mm において、P/V が 0.0065J/mm 以下の範囲、すなわち走査線速度  $V$  が 5000mm/s を越える高速走査条件にて特に鉄損改善率は増加し、8% を上回る高い値が得られることがわかった。一方、この集光径では P/V の値が 0.0065J/mm 以上、走査速度 5000mm/s 以下の条件では鉄損改善率は低下する傾向にある。この条件での鋼板表面を詳細に観察したところ、レーザ照射部は熔融・再凝固していることが判明した。この再凝固部では過大な引っ張り応力が発生しているため、ヒステリシス損が著しく増大した結果と考えられる。

従って、本発明の方法によれば、従来、レーザ平均出力や走査速度を調整しても鉄損特性が劣化していた 0.05mm 程度の極小集光ビーム径の領域でも、優れた鉄損特性が得られる。更に同等レベルの極小集光ビーム径を用いた従来技術（特公平 06-19112 号公報）で最適と開示されている条件よりも低いパワー範囲、あるいは高速の走査速度範囲で従来以上の鉄損改善率が得られるため、特性が優れるだけでなく、高効率で高速プロセスが実現可能である。

本発明の方法にてこのような優れた特性と効率が得られる理由は以下のように考察される。

磁区制御の理想は圧延方向に狭い環流磁区でヒステリシス損の増

加を抑制し、且つその狭い環流磁区に $180^\circ$  磁区を十分細分化させ得る強度を持たせることにある。環流磁区の源はレーザ照射による歪みであるが、歪みは鋼板表面近傍の温度分布に起因し、特に到達すべき温度と温度勾配に依存すると本発明者らは考えた。更にレーザ照射部の温度の空間分布はレーザビームの空間強度分布が影響すると考えた。そこでビームモードを考慮して、連続波レーザを走査照射した場合の定常状態におけるレーザ照射部の温度分布を熱伝導シミュレーションにより推定した。ここでの計算パラメータはビームモード、レーザ平均出力 $P$ 、走査線速度 $V$ である。

図5は本発明の条件に相当する $TEM_{00}$ モード、集光直径 $d0.05\text{mm}$ 、平均出力 $32\text{W}$ 、走査線速度 $8000\text{mm/s}$ での温度分布計算結果である。尚、座標 $x$ 、 $y$ 、 $z$ は図2に示す座標に相当する。図6(a)は、走査線速度 $V=4000\text{mm/s}$ 、 $P/V=0.008$ の条件での温度分布計算結果である。なお、他の条件は図5に同じである。また、図6(b)はこの実験条件にて得られた鋼板サンプルの断面観察写真であり、表面に熔融部分が見られる。図7はマルチモードの場合の計算結果であり、他の条件は図3に同じであり、表面に熔融部分が見られる。また図8は図5と図7の計算結果をビーム中心での深さ方向の温度変化を比較した結果である。

図5と図7の比較、および図8より、集光径が同じでも $TEM_{00}$ モードの場合はマルチモードの場合に比べ、等温線の間隔が狭く、温度分布の勾配が大きい。更に $600^\circ\text{C}$ レベルの高温部の浸透深さも深く、ビーム中心近傍に高温部が集中していることが推測される。本発明者らの実験によると、レーザ磁区制御された鋼板を $500^\circ\text{C}$ 以上の温度にて歪み取り焼鈍処理を行うと磁区制御効果が消失してしまうことがわかっている。従ってレーザ照射時には、この温度以上の温度履歴を経ることが必要と考えられ、この温度域の等温線が環流

磁区形状に影響していると想定される。また温度勾配が急峻な程、歪み量は大きいことが考えられるので、 $TEM_{00}$ モードの場合、狭い領域に強い歪みが形成される。その結果、一般のマルチモードを使う場合に比べて、 $TEM_{00}$ モードを使用する本発明では、極小集光ビームでも、狭く、且つ深い空間に磁区細分化に十分な環流磁区強度が得られるため、理想的な磁区制御がはじめて可能になるものである。

一方、パワーが増加、あるいは走査速度が低下することで $P/V$ が増加して図6に示すように表面温度が鋼板の融点である $1600^{\circ}\text{C}$ を越える箇所が発生する。この予測結果は実験により得られたサンプルの溶融断面と比較的よく一致しており、他の計算結果も合わせて、この温度分布の予測精度が高いことを示している。この様に溶融部が発生すると、前述したように溶融部の再凝固過程に大きな引っ張り応力が発生し、これが非常に広範囲な歪み、すなわち環流磁区を形成すると考えられる。その結果、ヒステリシス損が増大し始めるため、全体の鉄損特性は劣化する傾向となる。

以上の考察を基に、本発明者らは、極小ビーム集光により狭い環流磁区を形成して、優れた鉄損特性が得られる集光径、あるいは環流磁区幅、およびパワー、走査線速度の範囲を詳細に実験検討した。図10は照射ビームの圧延方向径 $d$ を $0.010\text{mm}$ から $0.200\text{mm}$ まで種々変化させて、鉄損改善率と $P/V$ の関係を調べた結果である。ここで圧延方向の照射ピッチ $P_1$ は $5\text{mm}$ である。この結果より、 $TEM_{00}$ モードでは $d$ および $P/V$ の広い範囲で鉄損の改善が見られることがわかる。特に $d$ が小さい場合には、より低い $P/V$ で高い改善率が得られることが判明した。高い改善率が得られるのは $0 < d \leq 0.20\text{mm}$ の範囲において、 $0.001 \leq P/V \leq 0.012\text{J/mm}$ である。更に、 $d$ の上限として好ましくは $0.1$ 、 $0.08$ 、 $0.06$ 、 $0.04$ 、 $0.03$ 、 $0.02\text{mm}$ 、下限として好ま

しくは、0.005、0.010mmに限定することで、より高い鉄損改善率を得られる。P/Vとの組み合わせにおいて更に好ましくは $0.010 \leq d \leq 0.10\text{mm}$ の範囲において $0.001 \leq P/V \leq 0.008\text{J/mm}$ 、あるいは $0.010 < d \leq 0.060\text{mm}$ の範囲において $0.002 \leq P/V \leq 0.006\text{J/mm}$ に限定することで、より高い鉄損改善率を得られる。比較的狭いレーザビーム集光径で高い鉄損改善が得られるのは、先に記述したようにヒステリシス損の増加が抑制されている効果と考えられる。

また上記の各dの範囲における、P/Vの最適な範囲は次のように説明される。すなわち、下限については環流磁区形成に十分なパワーを投入するために必要な値であり、一方、上限については、パワー密度が過大になり顕著な表面溶融が発生しない値である。例えば、ビーム径が小さい範囲では、より局所的な熱分布となるため改善効果は高くなるが、表面溶融を避けるためには、P/Vを更に小さい範囲に抑制することが好ましい。

尚、本発明の条件範囲で製造した方向性電磁鋼板のレーザ照射部を顕微鏡および磁区観察用SEMで詳細に観察したところ、照射ビーム径dにほぼ一致した照射痕と環流磁区幅W1が形成されていることが判明した。照射ビーム径dが0.015mmの場合の照射痕の顕微鏡観察写真、および磁区SEMによる環流磁区観察写真を図9に示す。従って、ビーム径dと環流磁区幅W1はほぼ一致する。図11は、照射痕跡幅を環流磁区の圧延方向幅W1と仮定し、各W1での最高改善率をまとめた結果である。W1の範囲が0.2mm未満、特に0.01から0.1mmの範囲で高改善率を得られる。W1の下限値としては、好ましくは0.005mm、より好ましくは0.010mmであり、上限値として好ましくは0.1mm、より好ましくは0.04mmである。

以上説明したように、レーザビームを極小集光する場合は、レーザビームのモードとパワーと走査速度条件を限定すれば、高い鉄損

改善効果が得られることが発見された。またその優れた特性が得られるパワー、走査速度範囲は従来技術で限定された範囲では適当ではなく、より低パワー、高速域が最適である。

更に照射痕の圧延方向ピッチ $P1$ も改善率に影響することが判明した。図12は $W1=0.015\text{mm}$ にて $P/V$ を0.0030に固定し、 $P1$ を1.5から13mmまで変化させた場合の改善率変化である。 $P1$ が1.5mm以下で狭すぎると各環流磁区によるヒステリシス損増加量は少ないものの、鋼板全体で形成される線状還流磁区の本数が大幅に増加するため、全ヒステリシス損は増加して鉄損は劣化する。一方、 $P1$ が11mmを越えて広すぎると、 $180^\circ$ 磁区の細分化効果が減少するため、鉄損特性はやはり劣化する。従って $P1$ の範囲は1.5mmから11mmの範囲が好ましい。更に、 $3.0 \leq P1 \leq 7.0\text{mm}$ の範囲が比較的 $P1$ に依存せず、最も高い改善効果が得られる。

次に本発明の製造方法としてファイバーレーザを使用する理由について説明する。

本発明の実施例で用いたファイバーレーザは石英ファイバーのコア部にYb（イッテルビウム）をドープしたものであり、半導体レーザを用いた励起により発振し、その発振波長は $1.07\mu\text{m}$ から $1.10\mu\text{m}$ である。従来電磁鋼板の磁区制御に使用されてきたYAGレーザ波長 $1.06\mu\text{m}$ と $\text{CO}_2$ レーザ波長 $10.6\mu\text{m}$ の間の波長であることがファイバーレーザの第一の特徴である。

またファイバーレーザの発振モードは前述のごとく、シングルモードに近似され、ビーム品質ファクター $M^2$ 値が理論限界の1に近い。これは一般のYAGレーザの $M^2$ 値が20以上であることに比べると非常に優れた性能である。

レーザビームは $M^2$ 値が小さいほど、あるいは波長が短いほど高い集光性を示す。ここで、レーザビームの集光可能な最小径 $d_m$ は波長

を $\lambda$ 、集光レンズの焦点距離を $f$ 、レンズへの入射ビーム径を $D$ とすると以下の式で表される。

$$d_m = M^2 \times (4 / \pi) \times f \times \lambda / D$$

よって、 $M^2$  値の大きいYAGレーザや波長 $\lambda$ の長い $\text{CO}_2$ レーザに比べ、ファイバーレーザは、より極小集光が可能であり、これが磁区制御におけるファイバーレーザの第二の特徴である。

以上の二つの特徴を鑑みて、本発明者らはファイバーレーザを使用することを特徴とする発明に至ったものである。すなわち、方向性電磁鋼板の表面はセラミック状のコーティングで覆われており、このコーティングのレーザ波長吸収特性は波長 $1\ \mu\text{m}$ から $10\ \mu\text{m}$ 帯の長波長側にかけて吸収率が上昇することに着目した。よってYAGレーザより波長の長いYbドープファイバーレーザを使用する場合、レーザパワーの鋼板への吸収量が増加し、より効率的な磁区制御が可能である。また集光性能が高いため、本発明の特徴である $W1 < 0.2\text{mm}$ の極小環流磁区を形成した方向性電磁鋼板の製造法に適する。また $\text{CO}_2$ レーザに比較して、波長吸収特性は劣位であるものの、波長の長い $\text{CO}_2$ レーザの場合、実用上安定して集光径 $0.2\text{mm}$ を得ることは困難となるため、やはり $\text{CO}_2$ レーザを使用する場合に比べ格段に有利である。従って、本発明を工業的に実施するにあたり、ファイバーレーザを使用することで、安定して効率よく、所望の特性を持つ電磁鋼板が製造できるものである。

また、ファイバーレーザの種類としてコアにEr（エリビウム）をドープしたファイバーレーザは発振波長が $1.55\ \mu\text{m}$ 近傍、Tm（ツリウム）をドープしたファイバーレーザは発振波長が $1.70 \sim 2.10\ \mu\text{m}$ であり、いずれのファイバーレーザを使用する方法も、前記の理由より本発明の方法に属するものである。

また、本発明の方法には容易に高出力の $\text{TEM}_{00}$ モードのレーザビ

ームが得られるファイバーレーザが最適であるが、その他 $TEM_{00}$ に近似のモードが得られ、かつ鋼板表面の波長吸収特性の高いレーザ装置であれば本発明に使用してもよい。

なお、本発明の実施例ではビーム集光形状が直径 $d$ の円形の場合を示したが、前述の説明にもあるように、理想的な磁区制御のために必要な条件は環流磁区の圧延方向幅が狭いことにあるため、圧延方向ビーム径 $d$ が本発明の範囲であるならば、ビーム走査方向径が $d$ と異なってもかまわない。例えばビーム走査方向のビーム径を $d$ よりも長くした楕円ビームとしてもよく、その結果、鋼板の表面にレーザ照射痕が発生しない方法も本発明に含まれる。

ただし、本件発明のレーザ照射法は通常と比べて中心付近のビーム強度が高いため、場合によってはレーザ照射後の表面に凹凸が発生することがある。そこで、照射ビームの形状を工夫して、レーザ照射部に凹凸が発生しないようにする必要がある。なぜならば、電磁鋼板を積層して積みトランスに用いる際に、鋼板に凹凸があると層間の電氣的絶縁性に影響を及ぼすからである。通常、電氣的絶縁性をより確実なものとするため、レーザ照射後の工程で、表面に絶縁コートを行うが、表面に凹凸が発生していると、このコーティングでも十分な絶縁性を確保することができなくなる。

そこで本発明者らはレーザ照射後の表面をほぼ平坦にし、高い層間絶縁性を得るレーザ照射方法を検討した。その結果、レーザ平均出力 $P$ とビームスキャン速度 $V$ にもある程度依存するものの、平均出力 $P$ と照射ビーム断面積で決まる瞬時パワー密度 $I_p$ によって層間の絶縁性を制御することが可能であることを見出した。ここで $I_p$ は、レーザ平均出力を $P$ 、圧延方向ビーム径を $d$ 、 $d$ と直交するビーム径を $d_c$ とすると次式である。

$$I_p = P / (d \times d_c) \quad [kW/mm^2]$$

絶縁性はコート後の層間電流を測定することにより評価される。図13は $I_p$ とコート後の層間電流の関係であり、同じ $I_p$ において走査速度 $V$ を変更して、層間電流を調べた結果である。コート後の層間電流値として200mA以下であれば、積みトランスとしての使用が可能である。この結果より、 $V$ の違いにも影響されるものの、 $I_p$ が130 kW/mm<sup>2</sup>未満、好ましくは100kW/mm<sup>2</sup>以下、より好ましくは70 kW/mm<sup>2</sup>以下であれば、層間電流は200mA以下に抑制される。 $I_p$ はレーザー照射した時の鋼板表面の瞬時的な蒸発現象を支配する要因であるため、表面状態、特に表面の凹凸を支配する要因であると考えられる。よって、本発明の方法において、 $I_p$ を100kW/mm<sup>2</sup>以下に抑制することで鉄損特性とともに、層間絶縁性に優れた電磁鋼板を製造することが可能である。例えば、 $d=0.015\text{mm}$ 、 $P=150\text{W}$ においては、集光ビーム形状を $d_c$ が好ましくは0.127mm以上となる楕円に設定することで優れた絶縁性が得られる。

レーザー平均出力 $P$ について説明する。本発明では前記のごとく $P/V$ の範囲が規定されている。よってレーザー平均出力 $P$ が小さくなると、板幅方向ビーム走査速度 $V$ も比例して小さくする必要がある。ところで、本発明のかかわる電磁鋼板の磁区制御プロセスの実用方法は、例えば特公平6-19112号公報に開示されるように、レーザービームを時間分割して周期的に鋼板に照射する。この場合、通板速度が速くなった場合、圧延方向の照射ピッチ $P_1$ を一定に保つには、この照射周期 $t(\text{sec})$ は短くなる。その周期の間に走査できる範囲 $W_c$ は走査速度と周期 $t$ の積となる。よってレーザー平均出力の小さい場合、 $V$ も小さくなり、その結果 $W_c$ も狭くなる。すなわち、レーザー平均出力が小さい場合、レーザー1台当たりの処理可能な幅が狭くなる。

例えば鋼板の板幅1000mm、ライン速度30mpm程度の実用的な連続処理プロセスを考えた場合、平均出力10W以下のレーザーではレーザー



1 台当たりの処理可能な幅が10mm程度と極端に狭くなり、必要レーザー台数が100台を超えることになる。よってレーザー出力は10W以上が好ましい。具体的には、20W、30W、40W、50W、100W、200W、300W、500W、800W、1 kW、2 kW、3 kW、5 kW、10kW、20kW、50kW等、種々のものが可能である。

#### 産業上の利用可能性

本発明は、極小集光されたレーザービームの走査照射により、極力鉄損の低減された方向性電磁鋼板を提出することが可能となる。

## 請 求 の 範 囲

1. 連続発振レーザービームの走査照射により、鋼板の圧延方向に対して概垂直で、且つ概一定間隔で線状の環流磁区を形成して鉄損特性を改善した方向性電磁鋼板の製造方法において、レーザーが、ビーム伝搬方向に垂直な断面内のレーザー光強度分布が光軸中心近傍に最大強度を持つTEM<sub>00</sub>モードであり、照射ビームの圧延方向集光径d [mm]、レーザービームの走査線速度V [mm/s]、レーザーの平均出力P [W] が以下の範囲であることを特徴とする磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法。

$$0 < d \leq 0.2$$

$$0.001 \leq P/V \leq 0.012$$

2. 前記d、V、Pが以下の範囲であることを特徴とする請求項1記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法。

$$0.010 \leq d \leq 0.10$$

$$0.001 \leq P/V \leq 0.008$$

3. 前記d、V、Pが以下の範囲であることを特徴とする請求項1記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法。

$$0.010 < d \leq 0.060$$

$$0.002 \leq P/V \leq 0.006$$

4. 前記d、V、Pが以下の範囲であることを特徴とする請求項1記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法。

$$0.010 < d < 0.040$$

$$0.002 \leq P/V \leq 0.006$$

5. 照射レーザービーム形状の圧延方向径をd、それと直交方向の径をdc、レーザー平均出力をPとした時、瞬時パワー密度I<sub>p</sub> [kW/mm<sup>2</sup>] をI<sub>p</sub> = P/(d×dc)で定義し、I<sub>p</sub>の範囲が0 < I<sub>p</sub> ≤ 100kW/mm<sup>2</sup>である

ことを特徴とする請求項 1 ～ 4 のいずれかの項に記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法。

6. 前記レーザ装置が、発振波長  $\lambda$  が  $1.07 \leq \lambda \leq 2.10 \mu\text{m}$  の連続発振ファイバーレーザ装置によるものであることを特徴とする請求項 1 ～ 4 のいずれかの項に記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法。

7. 前記レーザ装置が、平均出力 10W 以上の連続発振ファイバーレーザであることを特徴とする請求項 6 記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板の製造方法。

8. レーザビームの走査照射により、鋼板の圧延方向に対して概垂直で、且つ概一定間隔で線状の環流磁区を形成して鉄損特性を改善した方向性電磁鋼板において、レーザビーム照射痕およびまたは線状環流磁区の圧延方向幅  $W1$  が、  $0 < W1 \leq 0.2\text{mm}$  であることを特徴とする磁気特性の優れた方向性電磁鋼板。

9. レーザビーム照射痕およびまたは線状環流磁区の幅  $W1$  が  $0.01 \leq W1 \leq 0.1\text{mm}$  であることを特徴とする請求項 8 記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板。

10. レーザビーム照射痕およびまたは線状環流磁区の幅  $W1$  が  $0.01 \leq W1 \leq 0.04\text{mm}$  であることを特徴とする請求項 8 記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板。

11. レーザビーム線状照射痕およびまたは線状環流磁区の圧延方向間隔  $P1$  が、  $1.5 \leq P1 \leq 11.0\text{mm}$  であることを特徴とする請求項 8 ～ 10 のいずれかの項に記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板。

12. レーザビーム線状照射痕およびまたは線状環流磁区の圧延方向間隔  $P1$  が、  $3.0 \leq P1 \leq 7.0\text{mm}$  であることを特徴とする請求項 8 ～ 10 のいずれかの項に記載の磁気特性の優れた方向性電磁鋼板。

Fig. 1

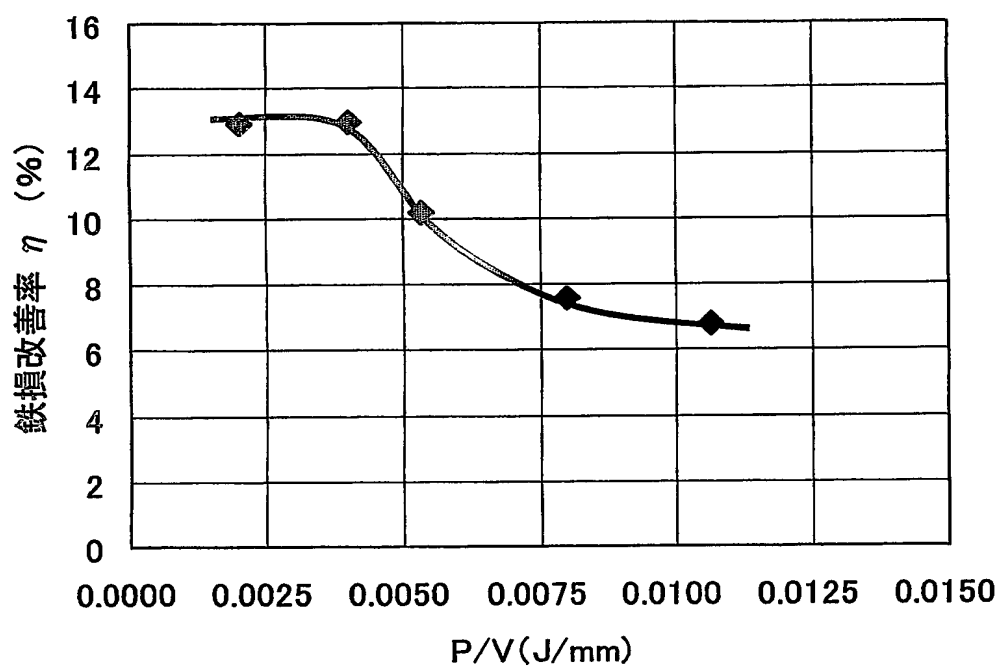




Fig. 3

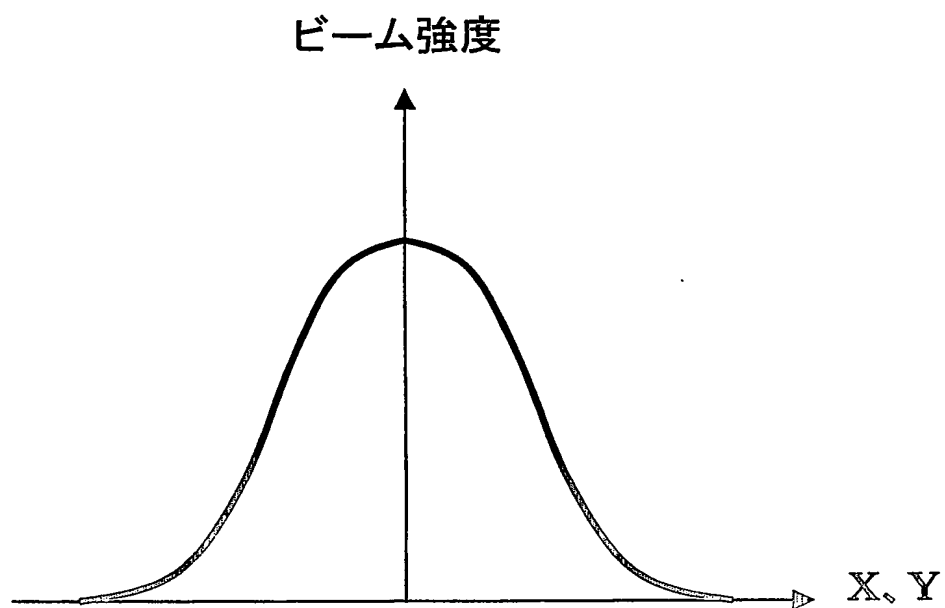


Fig. 4

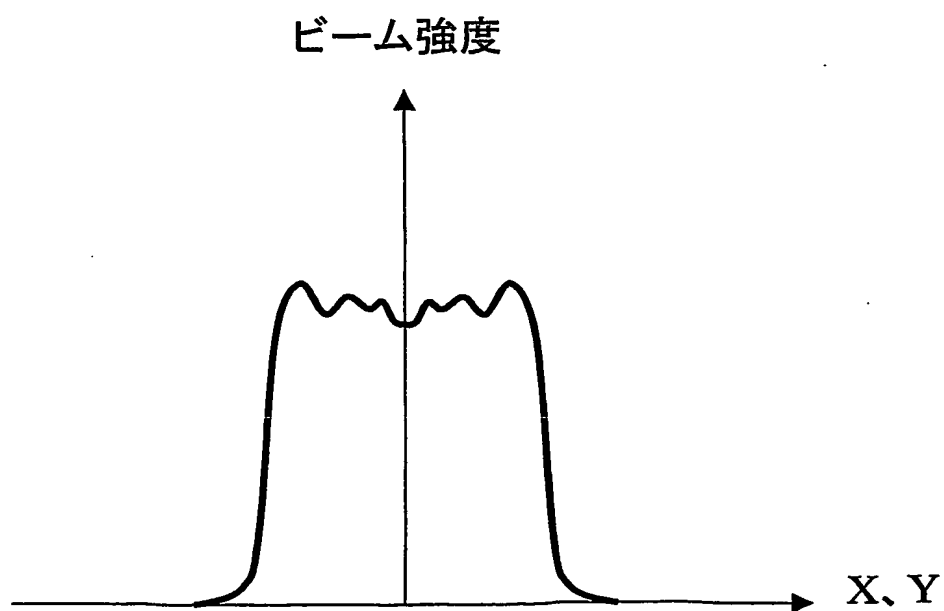
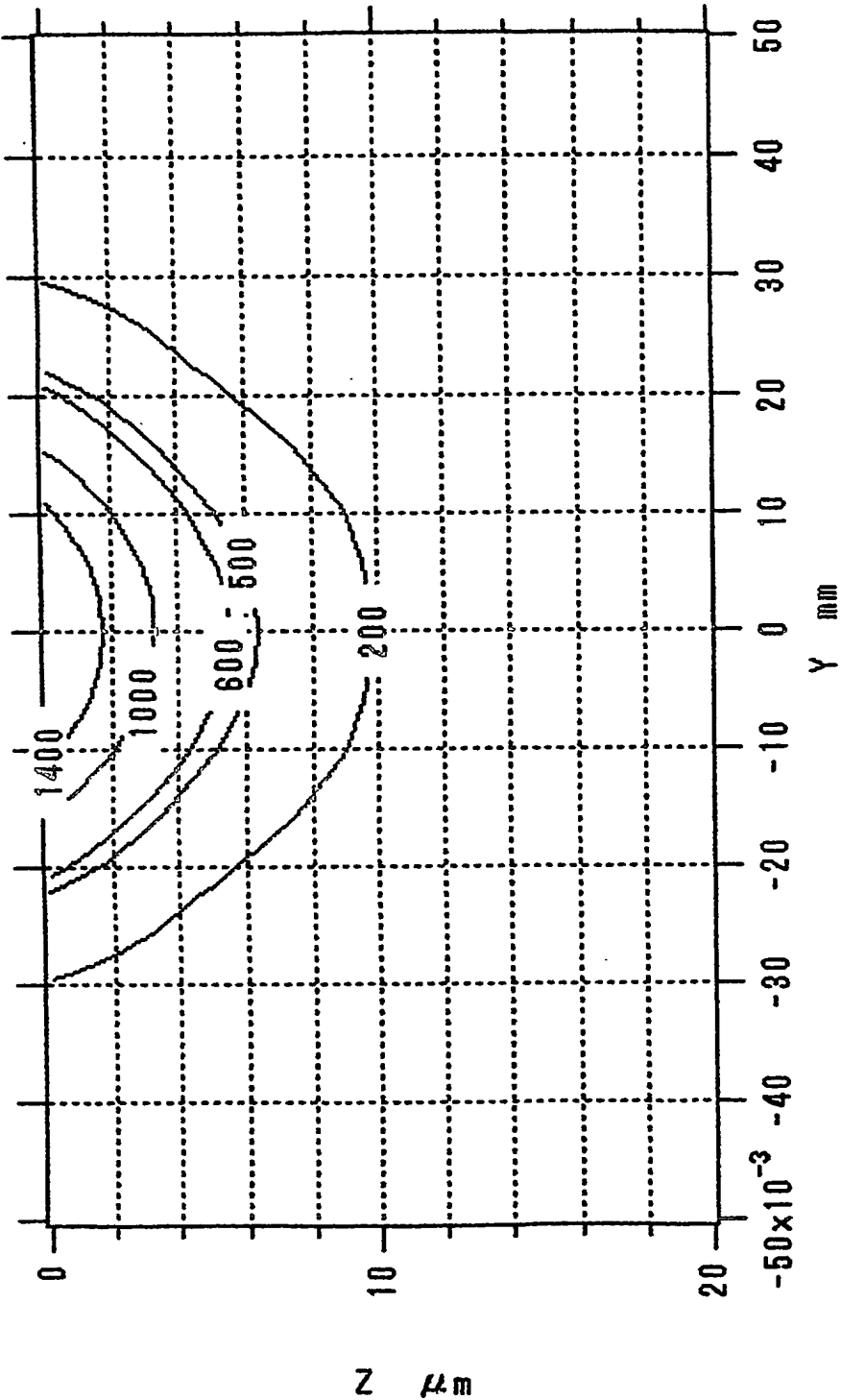


Fig.5



TEM<sub>00</sub>モード、 $d = 0.05\text{mm}$ 、 $V = 8000\text{mm/s}$

Fig.6(a)

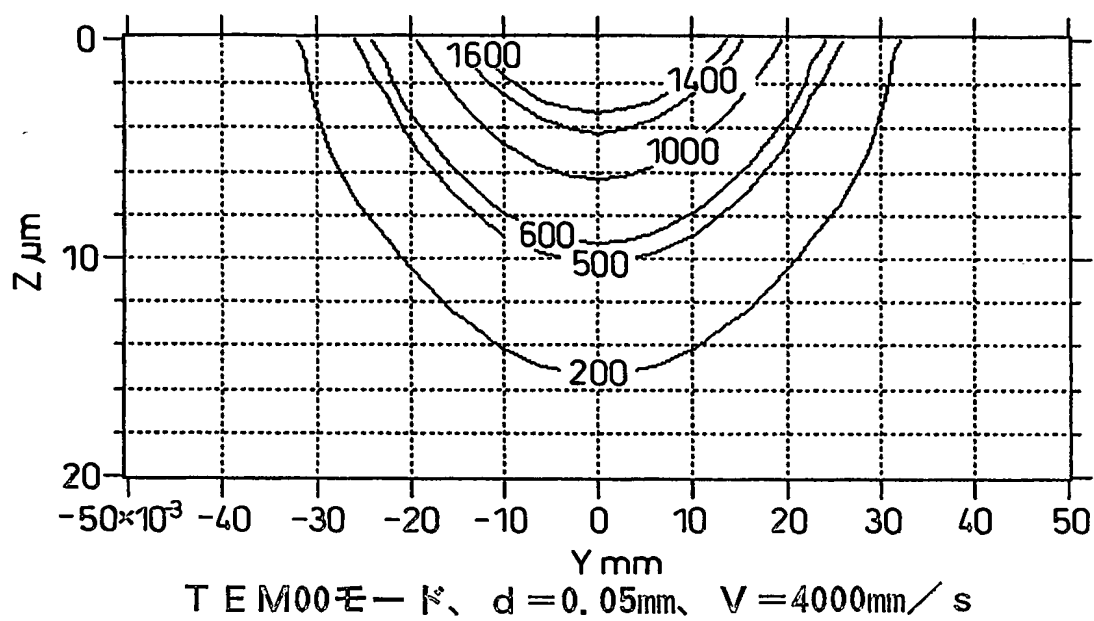


Fig.6(b)

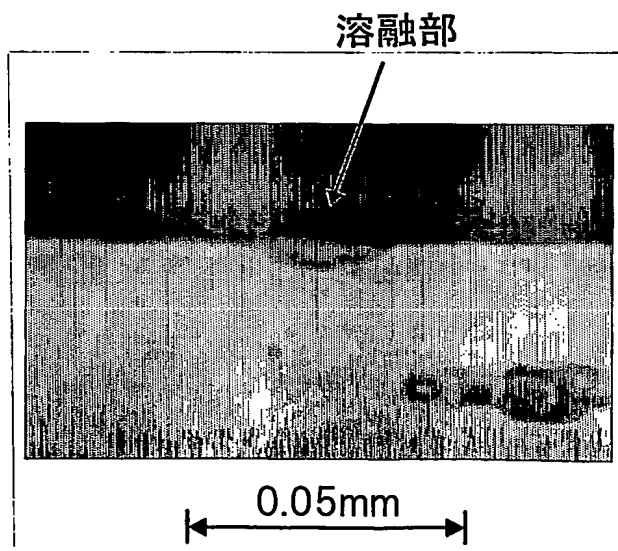




Fig.7

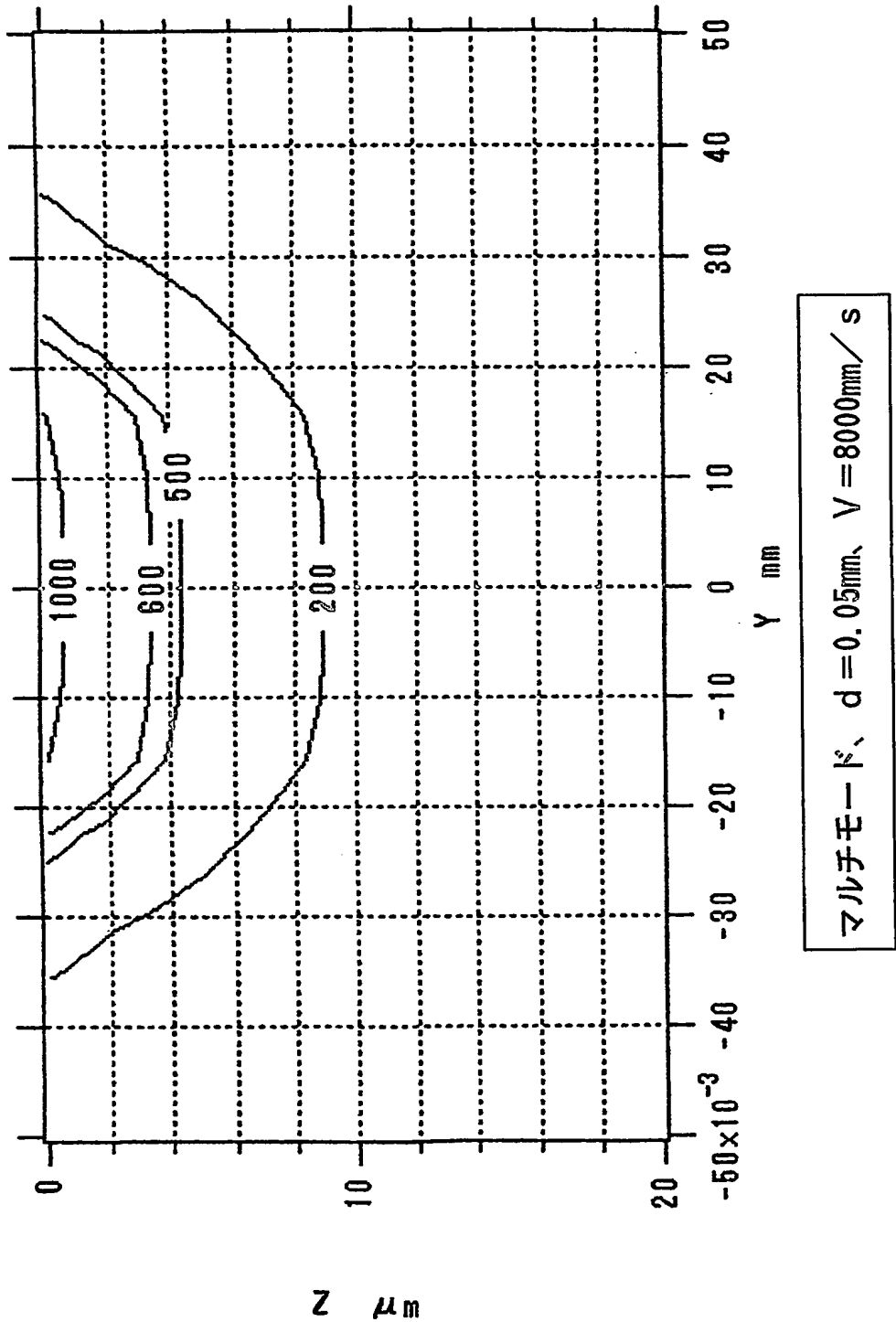


Fig. 8

温度分布のモード依存性  
d=0.05mm、P=32W、V=8000mm/s

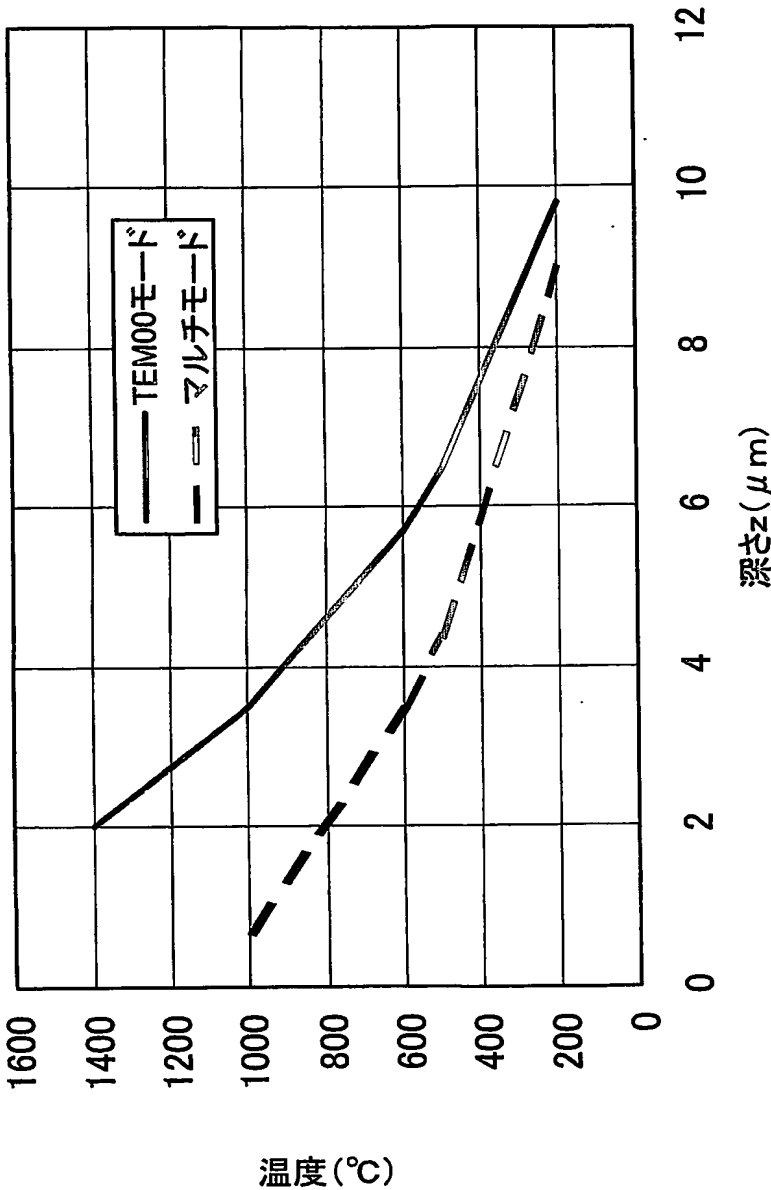


Fig.9(a)

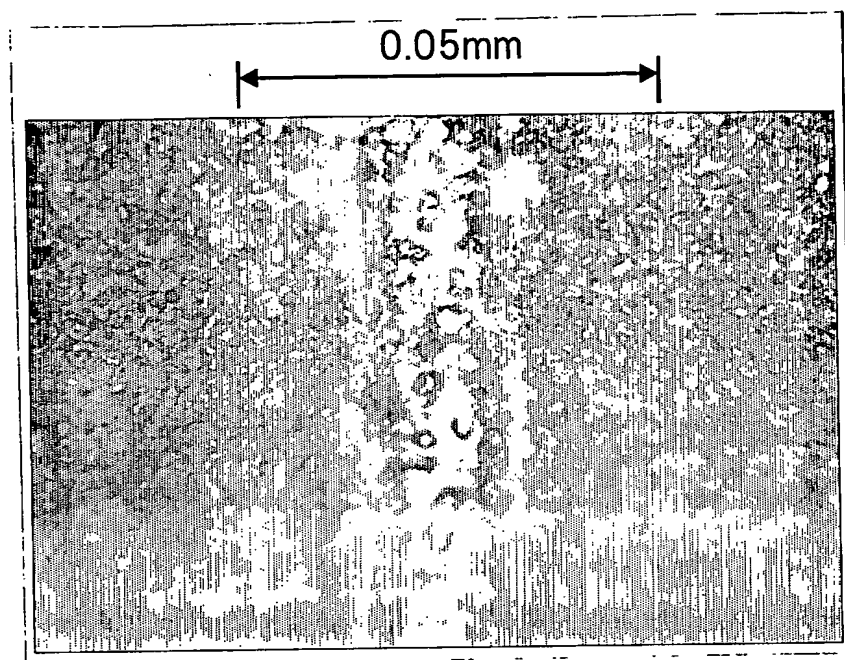


Fig.9(b)

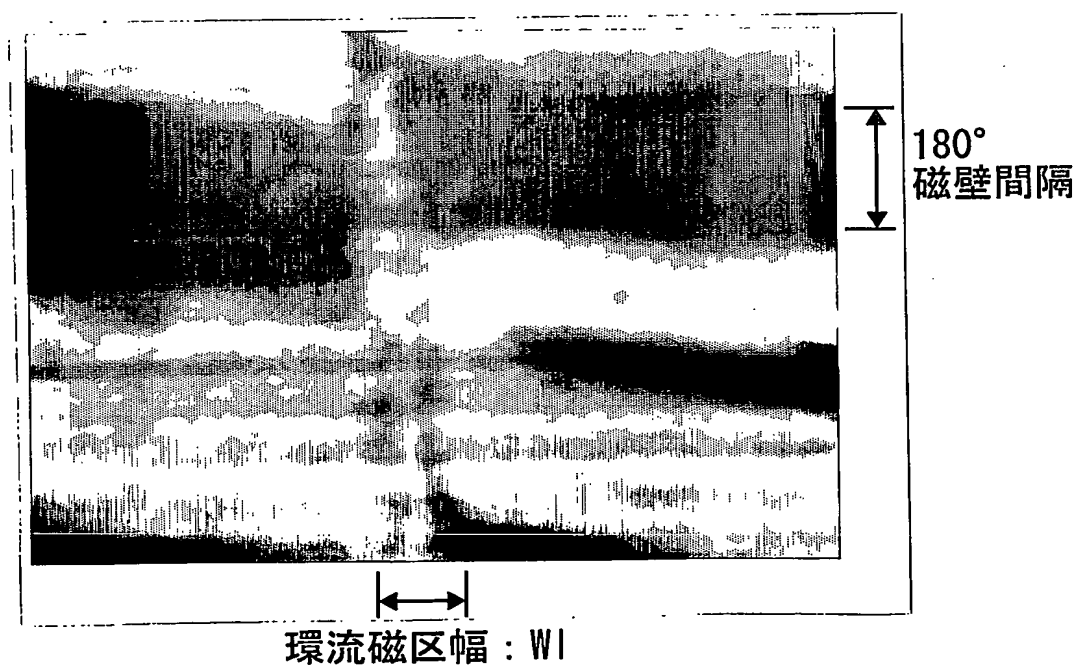


Fig.10

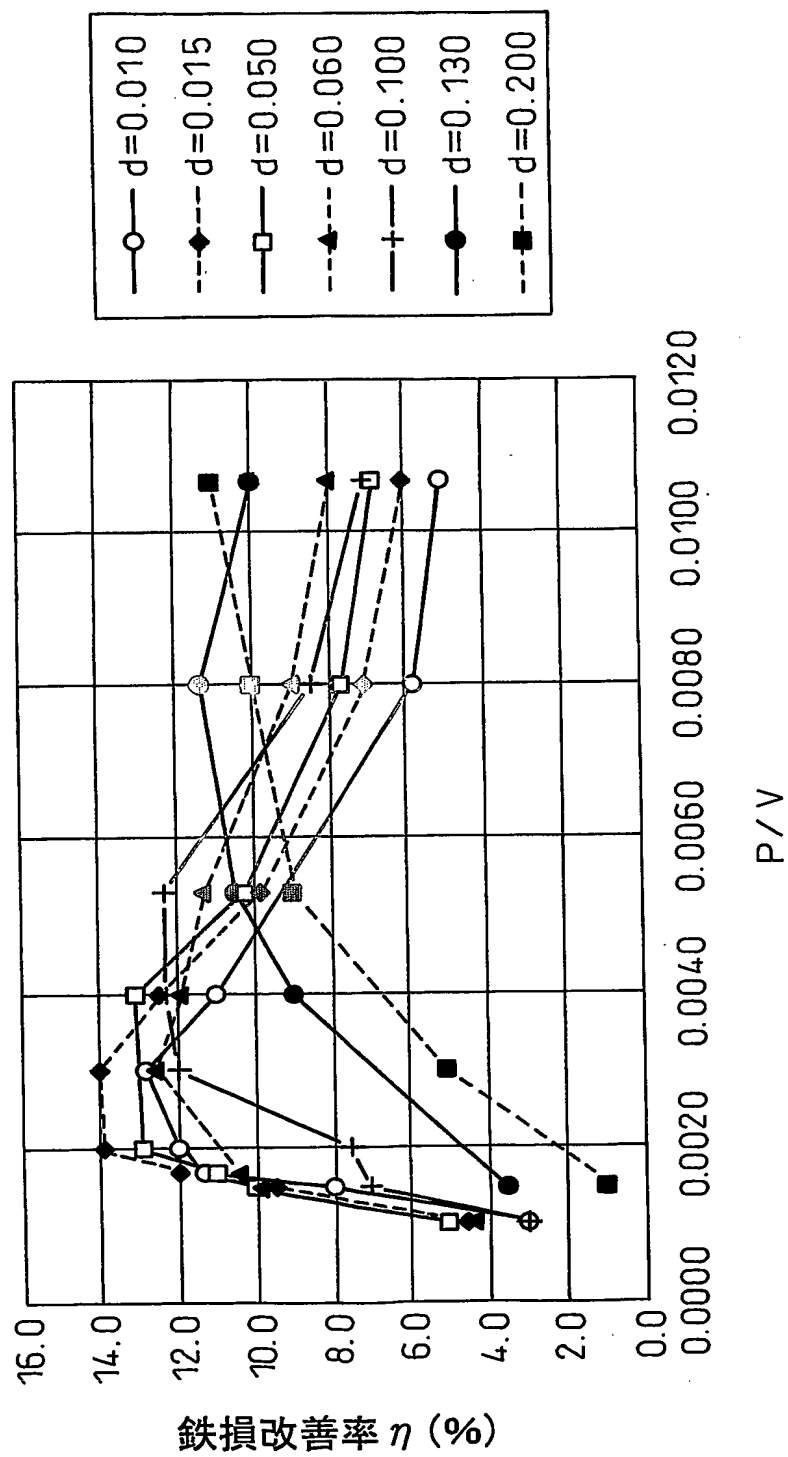


Fig.11

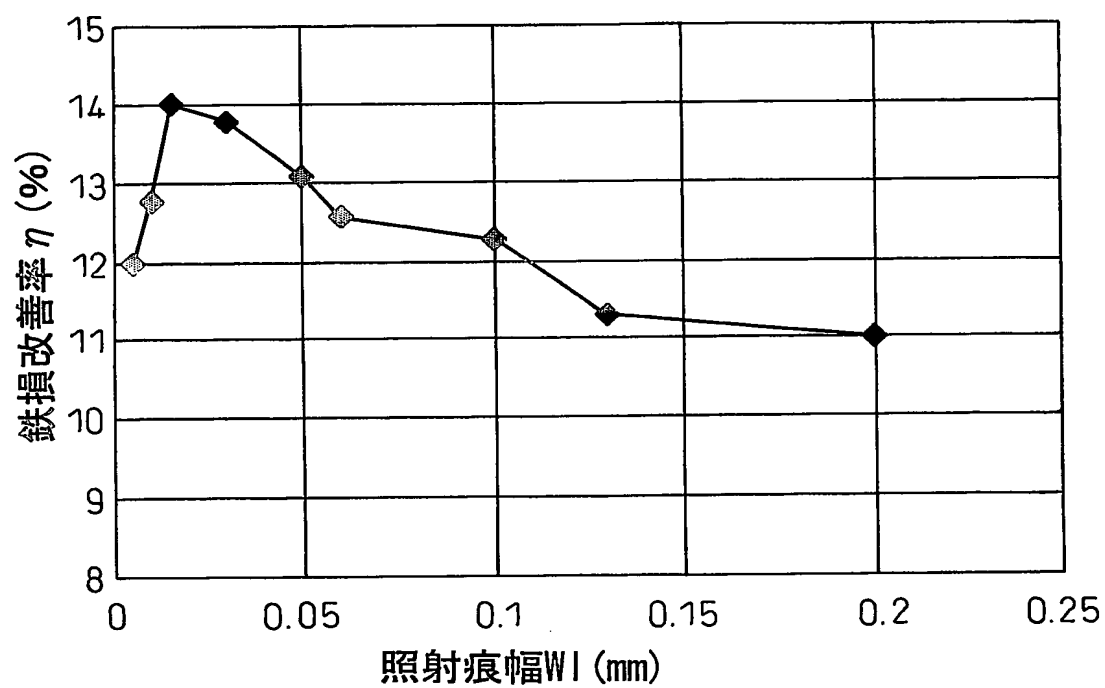


Fig.12

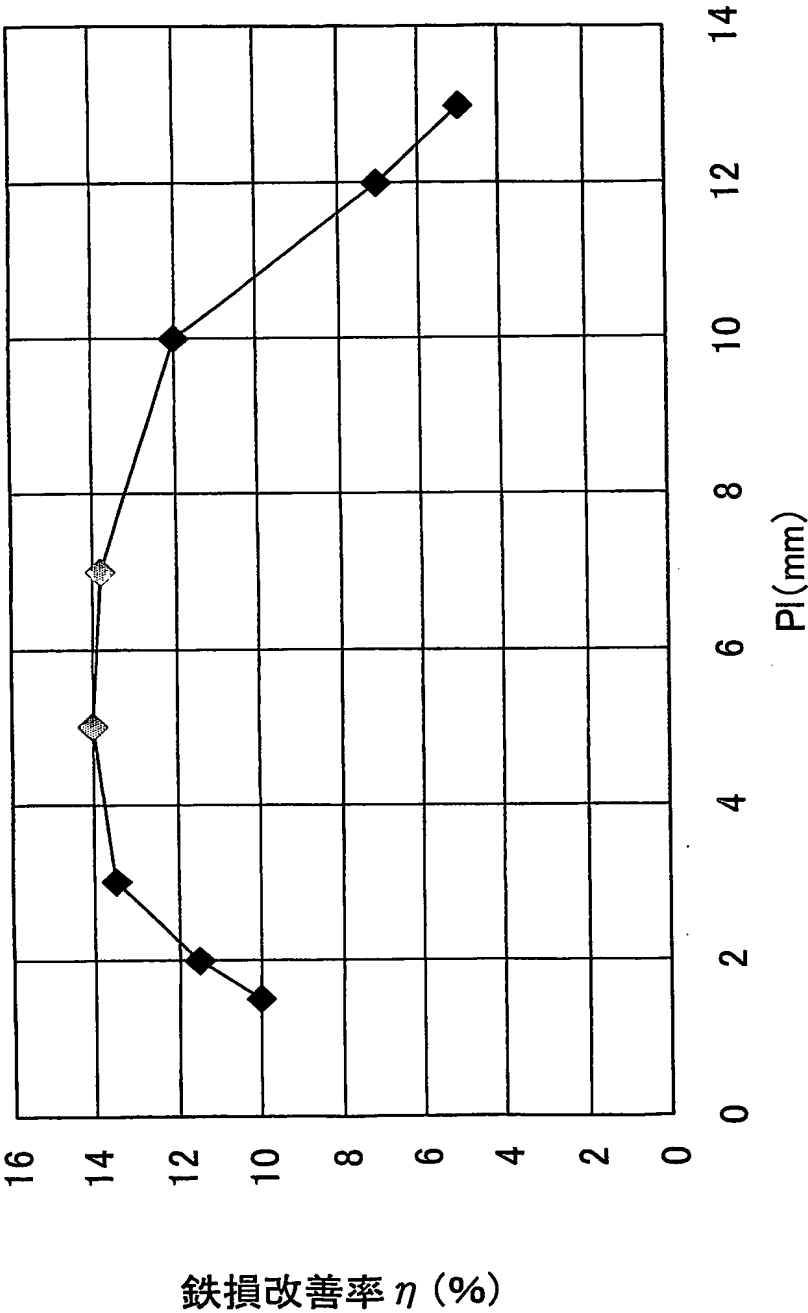
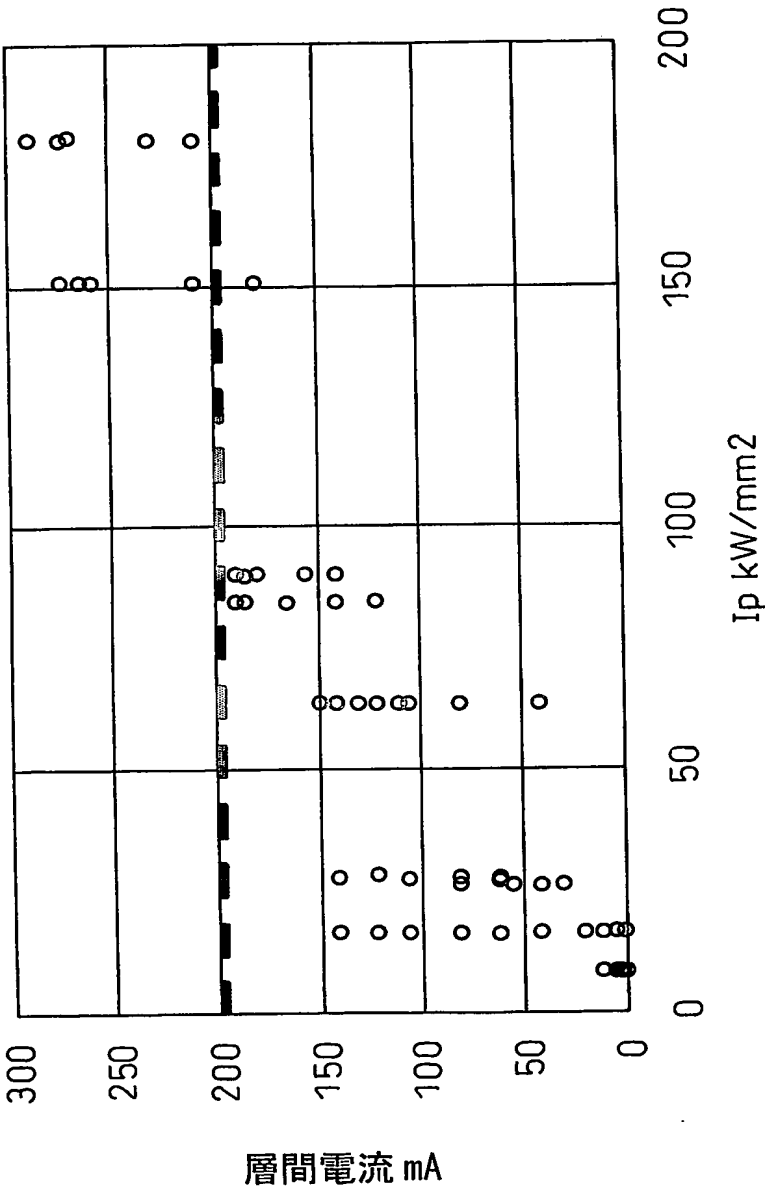


Fig.13



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/002866

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl<sup>7</sup> C21D8/12, C22C38/00, B23K26/00, H01F27/24, H01F41/02,  
H01S3/067

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl<sup>7</sup> C21D8/12, C22C38/00, B23K26/00, H01F27/24, H01F41/02,  
H01S3/067

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2004  
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2004 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2004

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 3-69968 B2 (Kawasaki Steel Corp.), 06 November, 1991 (06.11.91), Examples; Fig. 1 (Family: none)	8-12
A	JP 7-220913 A (Nippon Steel Corp.), 18 August, 1995 (18.08.95), (Family: none)	1-5
A	JP 6-19112 B2 (Nippon Steel Corp.), 16 March, 1994 (16.03.94), (Family: none)	1-5

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
01 June, 2004 (01.06.04)

Date of mailing of the international search report  
22 June, 2004 (22.06.04)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/002866

## C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2002-12918 A (Nippon Steel Corp.), 15 January, 2002 (15.01.02), & EP 1149924 A2 & KR 2001098841 A & US 6482271 B2	1-5
A	JP 10-204533 A (Nippon Steel Corp.), 04 August, 1998 (04.08.98), & EP 897016 A1 & CN 1216072 A & US 6368424 B1 & WO 98/32884 A1	1-5
A	JP 2001-15834 A (Hoya Corp.), 19 January, 2001 (19.01.01), (Family: none)	6,7

## A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl<sup>7</sup> C21D8/12, C22C38/00, B23K26/00,  
H01F27/24, H01F41/02, H01S3/067

## B. 調査を行った分野

## 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl<sup>7</sup> C21D8/12, C22C38/00, B23K26/00,  
H01F27/24, H01F41/02, H01S3/067

## 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年  
 日本国公開実用新案公報 1971-2004年  
 日本国登録実用新案公報 1994-2004年  
 日本国実用新案登録公報 1996-2004年

## 国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

WPI

## C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X	JP 3-69968 B2 (川崎製鉄株式会社) 1991. 11. 06, 実施例, 第1図 (ファミリーなし)	8-12
A	JP 7-220913 A (新日本製鐵株式会社) 1995. 08. 18 (ファミリーなし)	1-5
A	JP 6-19112 B2 (新日本製鐵株式会社) 1994. 03. 16 (ファミリーなし)	1-5

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの  
 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの  
 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)  
 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献  
 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

## の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの  
 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの  
 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの  
 「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

01. 06. 2004

国際調査報告の発送日

22. 6. 2004

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)  
 郵便番号100-8915  
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

佐藤 陽一

4K

9731

電話番号 03-3581-1101 内線 3435

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	JP 2002-12918 A (新日本製鐵株式会社) 2002. 01. 15 &EP 1149924 A2&KR 2001098841 A &US 6482271 B2	1-5
A	JP 10-204533 A (新日本製鐵株式会社) 1998. 08. 04 &EP 897016 A1&CN 1216072 A &US 6368424 B1&WO 98/32884 A1	1-5
A	JP 2001-15834 A (ホーヤ株式会社) 2001. 01. 19 (ファミリーなし)	6, 7